

чного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 3–10.

5. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.

6. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.

7. <http://www.ptc.com/products/mathcad/>.

8. *Разевиг В.Д.* Система схмотехнического моделирования MICRO CAP 5. – М.: СОЛОН, 1997. – 412 с.

9. *Межгосударственный ГОСТ 1516.2–97.* Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Минск: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.

*Поступила в редколлегию 25.03.2010*

УДК 621.373

**М.И.БАРАНОВ**, докт. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПІ»;  
**В.О.ЛЫСЕНКО**, асп., НТУ «ХПІ»

## **ЯВЛЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООСМОСА В КАПИЛЛЯРАХ «ЖИВОЙ» ДРЕВЕСИНЫ. ГИПОТЕЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА**

Наведено нова гіпотеза можливого виникнення і розрахункові оцінки явища високовольтного електроосмосу в капілярній структурі деревини в умовах дії на неї електростатичного поля Землі.

The new hypothesis of possible origin and calculation estimations of the phenomenon of high-voltage electro-osmose is resulted in the capillary structure of wood in the conditions of affecting it of the electrostatic field of Earth.

**Введение.** В 17-ом столетии европейским ученым Мальпиги [1] для растений был открыт восходящий ток (поток) почвенного раствора (сырого сока), содержащего растворенные в воде минеральные вещества и направленного от их корней к листьям. В дальнейшем наличие такого перемещения сырого сока (жидкого электролита) было установлено и в молодых периферических слоях древесины, размещенных у наружной части ствола дерева в зоне его камбия и содержащих вертикально расположенные пустотелые капиллярные сосуды (например, трахеиды овальной формы для древесины хвойных пород) [1, 2]. Диаметр этих отдельных капилляров (трахеид) в древесине варьируется от 10 мкм (для древесины в летний период) до 200 мкм (для древесины в весенний период) [2, 3]. При этом их длина вдоль ствола дерева составляет порядка 3 мм [2, 3]. Для подъема по таким соединенным между собой тончайшими сосудами капиллярам (трахеидам) сырого сока в деревьях высотой порядка 50 м требуется избыточное давление порядка 2 МПа [4].

Здесь требуется заметить, что в указанных капиллярах за счет сил поверхностного натяжения (явления капиллярности) вода способна подниматься на высоту не более 3 м [4]. Кроме того, корневое давление создает в капиллярах древесины избыточное гидростатическое давление всего порядка 0,1 МПа [4]. В этой связи перед специалистами естественных наук (в том числе и физиками) самой природой поставлен сложный и пока не решенный научный вопрос: какой механизм лежит в основе перемещения восходящего тока сырого сока (жидкого электролита) по капиллярам (трахеидам) древесины? В последние годы для ответа на этот актуальный вопрос определенное развитие получила теория сцепления (когезии) [5], в основу которой положено испарение воды клетками листьев дерева. Однако и данная теория не дает убедительного объяснения многим существующим в растительном мире фактам жизнедеятельности его разнообразных представителей. Для полноты рассматриваемой физической «картины» из мира растений и их капиллярных структур, а также из особенностей электрокинетических явлений в дисперсных системах укажем, что в 1809 году немецким ученым Ф.Ф. Рейсом было открыто явление электрического осмоса (электроосмоса) применительно к перемещению жидкости под действием внешнего электрического поля [6]. Данное явление он наблюдал для глинистых частиц в покоящейся жидкости при наложении на нее электрического поля в  $U$  – образной стеклянной трубке, перегородженной в нижней части мембраной из кварцевого песка. В настоящее время явление электроосмоса используется при фильтрации жидкостей, когда наряду с приложенным к ним гидродавлением параллельно применяется и электросмотический перенос жидкости в электрическом поле [6].

Целью данной работы является приближенное рассмотрение установившихся электрофизических и электрокинетических процессов, наблюдаемых в капиллярах (трахеидах) растущей («живой») древесины, с позиций возможного проявления в них за счет действия внешнего электрического поля Земли явления высоковольтного электроосмоса (ВЭО) для их жидкого электролита.

**1. Постановка задачи и основные допущения.** Рассмотрим вертикально размещенный в воздушной атмосфере (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна  $20^\circ\text{C}$ ) ствол растущего дерева хвойной породы в период его вегетативного развития (в период весна – осень) [2,3]. Примем, что находящийся в капиллярах (трахеидах) данной древесины почвенный водный раствор минеральных веществ (например, поваренной соли NaCl) из-за процесса интенсивной электролитической диссоциации полярных молекул растворенного в нем вещества на ионы является жидким электролитом, содержащим положительно (например, натрия  $\text{Na}^+$ ) и отрицательно (например, хлора  $\text{Cl}^-$ ) заряженные ионы [7]. Заметим, что данная диссоциация в нашем случае обусловлена аномально большим дипольным электрическим моментом полярных молекул воды, сильно ослабляющим электрическую

связь между ионами в молекулах растворенного в сыром древесном соке минерального вещества [7]. Считаем, что в капиллярах древесины с их тонкой целлюлозной стенкой (например, для трахеиды сосны толщина ее стенки из этого высокомолекулярного полимера составляет около 4,3 мкм [2]) на границе твердой фазы (стенки из целлюлозы) и жидкого электролита за счет диссоциации поверхностных ионогенных групп возникает двойной электрический слой (ДЭС), простейшая модель которого была впервые предложена в 1879 году известным немецким физиком Г. Гельмгольцем [8]. Полагаем, что в исследуемом случае ДЭС в капиллярах древесины, представляющий собой элементарный молекулярный конденсатор (рис.1), формируется у поверхности раздела твердой и жидкой фаз в трахеиде – капилляре. Твердую фазу капилляра образует его целлюлозная стенка, а жидкую фазу – вода с растворенными в ней химическими соединениями, подвергающимися явлению электролитической диссоциации. В этой связи одной обкладкой указанного конденсатора в ДЭС капилляра древесины служит отрицательно заряженная внутренняя поверхность его стенки (с ионами целлюлозных волокон, как правило, типа  $\text{COOH}^-$ ), а другой обкладкой – положительно заряженные ионы (как правило, натрия  $\text{Na}^+$ ) жидкого электролита внутри капилляра [6,8]. Пусть количество потенциалопределяющих ионов (например, типа  $\text{COOH}^-$ ) на поверхности стенки капилляра и противоионов (например, натрия  $\text{Na}^+$ ) в наружном слое диффузной части жидкого электролита указанного ДЭС равно друг другу. Считаем, что молекулярный слой жидкого электролита толщиной  $d_m$ , непосредственно прилегающий к поверхности целлюлозной стенки капилляра древесины (слой Штерна [9]), остается неподвижным. Принимаем, что толщина  $d_{2c}$  ДЭС в капиллярах древесины соответствует примерно толщине трех молекулярных слоев его жидкого электролита, то есть  $d_{2c} = 3d_m$  [8]. Так как радиус кривизны стенки капилляра (трахеиды) древесины оказывается значительно больше величины  $d_{2c}$ , то ДЭС в рассматриваемом случае можно считать плоским. Направленное вдоль плоского ДЭС перемещение (скольжение) в его диффузной части противоионов жидкого электролита капилляра под действием внешнего электростатического поля Земли с напряженностью  $E_0$  возможно только вдоль плоскости разрыва ДЭС за зоной слоя Штерна [9].

**2. Предлагаемая гипотеза возникновения явления ВЭО в капиллярах древесины.** Авторы с учетом имеющихся научных знаний в области растениеводства, фитоботаники деревьев, коллоидной физхимии, электрохимии и электрофизики в рамках этой статьи выдвигают следующее новое научное предположение или гипотезу: *в капиллярной структуре растущей древесины из-за действия на нее и содержащийся в ней восходящий от корня к кроне дерева сырой сок (жидкий электролит) внешнего электростатического поля Земли возможно возникновение явления ВЭО, обеспечивающего вертикальное перемещение по капиллярам древесины*

находящихся в них продуктов электролитической диссоциации жидкого электролита и самого электролита.

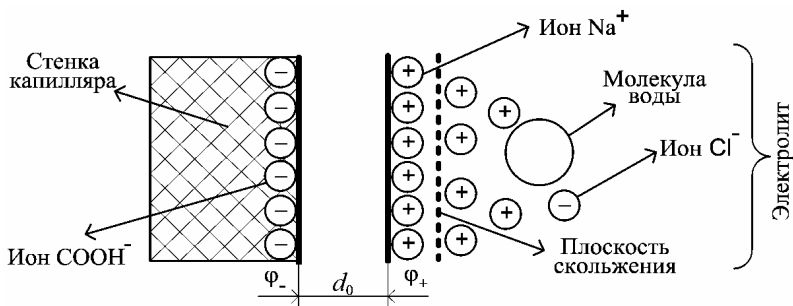


Рисунок 1 – Упрощенная схема ДЭС на поверхности целлюлозной стенки капилляра (трахеиды) древесины с прилегающими к ней противоionsами жидкого электролита

С учетом выдвинутой выше гипотезы приведем ниже некоторые приближенные расчеты для теоретического обоснования сделанного научного предположения о возможности возникновения в капиллярах (трахеидах) древесины с жидким электролитом (почвенным водным раствором) явления ВЭО, способного обеспечить вертикальное перемещение по данным капиллярам образовавшихся от его электролитической диссоциации ионов (например, противоionsов натрия  $\text{Na}^+$ ) и соответственно вовлекаемого этими ионами в это движение вверх к кроне жидкого электролита капилляров древесины в целом.

**3. Оценка уровней напряженности и электрического потенциала в электростатическом поле Земли.** Ограничимся в декартовой системе координат рассмотрением случая, когда плоская поверхность Земли, на которой размещен исследуемый ствол древесины, заряжена положительно и характеризуется поверхностной плотностью  $\sigma_3$  электрического заряда (рис. 2).

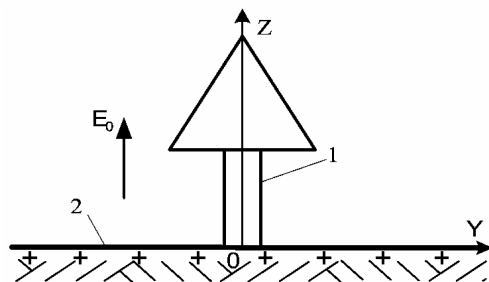


Рисунок 2 – Упрощенная расчетная схема расположения древесины в

электростатическом поле Земли (1 – древесина; 2 – заряженная поверхность Земли)

Используя теорию электростатического поля, можно показать, что в данном случае для ориентированной перпендикулярно положительно заряженной плоскости Земли напряженности  $E_0$  ее электростатического поля при  $z > 0$  в области, прилегающей к земной поверхности (примерно для  $z \leq 500$  м), будет справедливо следующее приближенное расчетное соотношение [7]:

$$E_0 = 0,5 \sigma_3 / \varepsilon_3, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_3 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная [10].

Полагая из физических соображений электрический потенциал в точках заряженной поверхности Земли равным нулю, для электрического потенциала  $\varphi_3$  в воздушном пространстве (при  $z > 0$  в указанной области) с рассматриваемой древесиной получаем следующее приближенное выражение [7]:

$$\varphi_3 = -0,5 \sigma_3 z / \varepsilon_0. \quad (2)$$

Принимая во внимание относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_\partial$  древесины (для сосны численно равна около 4 [10]), из (1) для напряженности  $E_\partial$  продольного электростатического поля в древесине получаем:

$$E_\partial = 0,5 \sigma_3 / (\varepsilon_0 \varepsilon_\partial). \quad (3)$$

Аналогично (3) для электрического потенциала  $\varphi_\partial$  в древесине вертикально расположенного ствола дерева с учетом (2) приближенно имеем:

$$\varphi_\partial = 0,5 \sigma_3 z / (\varepsilon_0 \varepsilon_\partial). \quad (4)$$

Известно, что при безоблачной воздушной атмосфере уровень напряженности  $E_0$  невозмущенного электростатического поля Земли составляет порядка 200 В/м [11]. В то же время в предгрозовый период при наличии в атмосфере дождевых облаков величина напряженности  $E_0$  для возмущенного ими и явлением электростатической индукции электрического поля у земной поверхности достигает значения порядка 100 кВ/м [12]. Поэтому с учетом того, что обычно воздушная атмосфера над поверхностью Земли и соответственно над исследуемой растущей древесиной содержит облачные образования с зарядами в своих нижних частях, как правило, отрицательной полярности в дальнейших оценочных расчетах электрофизических процессов, характерных для явления ВЭО в капиллярах древесины, целесообразно ограничиться использованием некоторого усредненного максимального значения напряженности  $E_0$  в области произрастания древесины, численно равного для воздуха примерно 5 кВ/м. Согласно (1) данному численному значению напряженности  $E_0$  будет соответствовать поверхностная плотность  $\sigma_3$  электрического заряда на земной поверхности, количественно равная около  $8,854 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что данный уровень плотности заряда  $\sigma_3$  на поверхности Земли оказывается на порядок меньшим значений поверхностной плотности свободных зарядов, характерных для металлических проводников в области высоковольтной слабо- и сильноточной техники [13]. Модуль электрического потенциала по (2) при таком численном значении величины  $\sigma_3$  и  $z = 50$  м для воздуха может составить около 250 кВ, а для древе-

сины по (4) при  $\varepsilon_0 = 4$  – примерно 62,5 кВ. Заметим, что разность электрических потенциалов между обкладками «земного» сферического макроконденсатора составляет около 400 кВ [11]. В этой связи можно говорить о том, что в указанных выше для древесины электрических условиях электроосмос в ее капиллярах с восходящим к кроне дерева потоком электролита будет носить высоковольтный характер.

**4. Оценка возможности протекания в электростатическом поле Земли явления ВЭО для капиллярной структуры «живой» древесины.** В рамках данной оценки рассмотрим уравнение вертикального движения вдоль плоскости скольжения в принятом ДЭС капилляра древесины одиночного одновалентного противоиона натрия  $\text{Na}^+$  в следующем приближенном виде:

$$e_0 E_0 = m_i g_i + 2 \eta_s v_i r_i, \quad (5)$$

где  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона [10];  $m_i = 38,17 \cdot 10^{-27}$  кг – масса иона натрия  $\text{Na}^+$ ;  $g_i = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения [10];  $r_i = 2,11 \cdot 10^{-10}$  м – радиус иона натрия  $\text{Na}^+$ ;  $v_i$  – скорость перемещения вдоль капилляра (ствола древесины) иона натрия  $\text{Na}^+$ ;  $\eta_s$  – коэффициент вязкости жидкого электролита в капилляре древесины (для почвенного водного раствора его величина составляет около  $1,005 \cdot 10^{-3}$  Па·с [10]).

При  $E_0 = E_0 / \varepsilon_0 = 1,25$  кВ/м и  $v_i = 2,778 \cdot 10^{-4}$  м/с = 1 м/ч [4] из уравнения (5) следует, что его левая часть численно равна  $2,002 \cdot 10^{-16}$  Н, а его правая часть оказывается равной  $1,178 \cdot 10^{-16}$  Н. Выполненная приближенная оценка динамического поведения иона натрия  $\text{Na}^+$  в жидком электролите капилляра древесины указывает на принципиальную возможность его вертикального подъема от корня к кроне дерева в заданном электростатическом поле Земли.

**5. Оценка уровней плотностей электрических зарядов и электрических потенциалов для ДЭС капиллярной структуры «живой» древесины.** Считаем, что в ДЭС расстояние  $d_0$  между его электрическими слоями толщиной  $d_m$  (согласно рис. 1 обкладками с потенциалами  $\phi_-$  и  $\phi_+$ ) равно усредненному межмолекулярному расстоянию в жидком электролите (почвенном водном растворе) капилляра древесины. Тогда величину  $d_0$  в исследуемом ДЭС можно определить на основании следующего выражения [7]:

$$d_0 = (\mu_B / N_A \rho_B)^{1/3}, \quad (6)$$

где  $\mu_B$  – молярная масса электролита (для воды равна 0,018 кг/моль [10]);  $\rho_B$  – плотность электролита (для воды равна 1000 кг/м<sup>3</sup> [10]);  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – постоянная Авогадро [10].

Из (6) находим, что в рассматриваемом ДЭС  $d_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  м. Учитывая уровни концентраций (объемных плотностей) атомов (молекул) для металлов и жидкостей, практически разнящихся на порядок, можно в первом приближении для поверхностной плотности  $\sigma_0$  зарядов ионов  $\text{COOH}^-$  и  $\text{Na}^+$  на сверхтонких обкладках нашего ДЭС принять, что  $\sigma_0 = \sigma_3 = 8,854 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>. В ре-

зультате для разности электрических потенциалов ( $\varphi_- - \varphi_+$ ) на обкладках ДЭС в рассматриваемом плоском молекулярном конденсаторе получаем:

$$\varphi_- - \varphi_+ = \sigma_0 d_0 / \epsilon_0. \quad (7)$$

При используемых параметрах ДЭС ( $d_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  м;  $\sigma_0 = 8,854 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>) из (7) следует, что указанная разность равна:  $(\varphi_- - \varphi_+) = 3 \cdot 10^{-6}$  В. Далее для модуля электрического потенциала обкладки ДЭС с потенциалопределяющими ионами  $\text{COOH}^-$  воспользуемся известным расчетным соотношением [13]:

$$\varphi_- = 0,5 \sigma_0 S_0^{1/2} / (\pi^{1/2} \epsilon_0), \quad (8)$$

где  $S_0$  – площадь плоской части стенки одиночного капилляра (трахеиды) древесины в области рассматриваемого ДЭС.

В соответствии с [2] для трахеиды сосны (при ее ширине 44,6 мкм и длине 3,25 мм) величина  $S_0$  может численно составить значение, примерно равное  $14,5 \cdot 10^{-8}$  м. Подставив данное численное значение площади  $S_0$  в (8), при  $\sigma_0 = 8,854 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup> для искомого электрического потенциала  $\varphi_-$  в ДЭС находим, что он оказывается примерно равным 1,074 В. Из приведенных оценочных расчетных данных видно, что электрический потенциал  $\varphi_+$  другой молекулярной обкладки ДЭС с противоионами натрия  $\text{Na}^+$  при этом принимает значение, численно составляющее около  $(1,074 - 3 \cdot 10^{-6})$  В. Поэтому можно считать, что в исследуемом ДЭС его плоские обкладки молекулярной толщины  $d_m = 3,85 \cdot 10^{-10}$  м [14] имеют противоположные по знаку и практически равные по модулю электрические потенциалы  $\varphi_-$  и  $\varphi_+$ . Здесь важно подчеркнуть то, что при принятых исходных данных модули потенциалов  $\varphi_-$  и  $\varphi_+$  для ДЭС вблизи тонкой целлюлозной стенки капилляра (трахеиды) древесины по порядку величины равны около 1 В, что хорошо согласуется с известными данными для падения напряжения на сверхтонкой диэлектрической стенке оболочки (мембраны) клетки биологического происхождения [15].

**6. Оценка в условиях ВЭО уровня скорости перемещения жидкого электролита в капиллярной структуре «живой» древесины.** С этой целью на основе известного закона Ньютона [7], учитывающего явление внутреннего трения между перемещающимися слоями вязкой жидкости, запишем уравнение для напряжения трения (сдвига) в вертикально смещающемся под действием продольной напряженности  $E_\partial$  электростатического поля Земли в области исследуемого плоского ДЭС за его зоной Керна слое жидкого электролита капилляра (трахеиды) древесины в следующем приближенном виде:

$$\sigma_0 E_\partial = \eta_3 v_3 / d_3, \quad (9)$$

где  $v_3$  – скорость перемещения вдоль стенки капилляра положительно заряженных противоионов натрия  $\text{Na}^+$  в диффузной части ДЭС и соответственно жидкого электролита трахеиды древесины;  $d_3$  – толщина перемещающегося вдоль ДЭС слоя жидкого электролита трахеиды древесины.

Из (9) для искомой скорости  $v_3$  ламинарного перемещения снизу вверх от корня к кроне дерева жидкого электролита капилляров древесины имеем:

$$v_3 = \sigma_0 E_\partial d_3 / \eta_3. \quad (10)$$

При  $d_s = 100$  мкм и принятых численных значениях иных исходных электрофизических параметров для жидкого электролита капиллярной структуры древесины ( $E_0 = 1,25$  кВ/м;  $\sigma_0 = 8,854 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>2</sup>;  $\eta_s = 1,005 \cdot 10^{-3}$  Па·с) на основании (10) для скорости  $v_s$  получаем оценочную расчетную величину, равную  $0,11 \cdot 10^{-4}$  м/с = 0,04 м/ч. Поэтому можно заключить, что возможное возникновение в условиях воздействия на растущее в воздушной атмосфере дерево геоэлектростатического поля явления ВЭО в капиллярах (трахеидах) древесины будет способствовать ламинарному перемещению их жидкого электролита (почвенного водного раствора) от корней к кроне вертикально размещенного «живого» дерева практически неограниченной высоты.

## Выводы

1. Предложена новая гипотеза возникновения в капиллярной структуре древесины, расположенной в воздушной атмосфере с электростатическим полем Земли и содержащей потенциально восходящий ток жидкого электролита (сока) с продуктами его электролитической диссоциации, явления ВЭО.
2. Приведенные приближенные расчетные оценки ряда электрофизических и электрокинетических процессов в капиллярной структуре древесины в условиях действия на нее напряженности геоэлектростатического поля свидетельствуют о возможности вертикального ламинарного перемещения снизу вверх положительно заряженных ионов ее жидкого электролита (почвенного водного раствора) и самого электролита на неограниченные расстояния.

**Список литературы:** 1. Энциклопедии мира / «Большой Брокгауз» <http://tmn.fio.ru/works/58x/305/Bbrockhaus.htm>. 2. Баранов М.И., Лысенко В.О. Приближенные модели электродинамического разрушения древесины в атмосферном воздухе под действием прямого удара в нее линейной молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №39. – С. 10-18. 3. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: Справочник / Под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 296 с. 4. <http://meduniver.com/Medical/Biology/319.html>. 5. <http://meduniver.com/Medical/Biology/327.html>. 6. <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/5302.html>. 7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с. 8. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы. – М.: МГТУ, 2001. – 640 с. 9. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. – М.: Наука, 1976. – 328 с. 10. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 11. Верещагин И.П., Макальский Л.М., Морозов В.С. Электрофизические процессы в облаках / Под ред. Г.З. Мирзабекяна. – М.: МЭИ, 1986. – 68 с. 12. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. – М.: Знак, 2003. – 330 с. 13. Баранов М.И. Новый электрофизический подход по теоретическому обоснованию явления электромагнитной индукции Фарадея в движущемся металлическом проводнике // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 1. – С. 24-28. 14. Баранов М.И. Электрофизическая природа шаровой молнии / Электричество. – 2009. – № 9. – С. 15-25. 15. Бойко Н.И., Бондина Н.Н., Левченко Е.В., Михайлов В.М. Использование потока для анализа воздействия полей на поляризующиеся тела // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 6. – С.6-10.

Поступила в редколлегию 09.03.2010